

# 黄土丘陵沟壑区刺槐混交林生态化学计量特征与碳储量

焦秋燕<sup>1,2</sup>, 黄林嘉<sup>1,2</sup>, 张娟娟<sup>3</sup>, 张旭<sup>3</sup>, 黄宁<sup>4</sup>, 郭珍<sup>5</sup>, 曹扬<sup>1,6</sup>

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;  
2.中国科学院大学,北京 100049;3.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;  
4.北川羌族自治县水土保持服务中心,四川 北川羌族自治县 622750;5.四川华标检测技术有限公司,  
成都 610066;6.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了探讨混交林与纯林养分状况和固碳能力的差异,以黄土丘陵沟壑区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林、油松(*Pinus tabulaeformis*)纯林以及刺槐+油松(*Robinia pseudoacacia*+*Pinus tabulaeformis*)混交林、刺槐+山杨(*Robinia pseudoacacia*+*Populus davidiana*)混交林为对象,通过野外调查和室内分析相结合的方式,研究混交林与纯林生态系统的生态化学计量特征与碳储量。结果表明:(1)刺槐+油松混交林显著增加刺槐枝和根的 C 含量和叶、干的 P 含量及枝的 C:P 与 N:P,并显著增加油松叶、枝和根的 N 含量和枝、干、根的 N:P,但显著降低油松各器官的 C:N,而刺槐+山杨混交林仅显著增加刺槐枝的 P 含量。(2)刺槐+油松混交林的土壤 C 含量显著高于刺槐纯林,土壤 P 含量显著低于油松纯林;刺槐+山杨混交林与刺槐纯林土壤 P 含量差异不显著。(3)总体纯林中乔木叶片与凋落物的 C 含量显著相关,C:N、C:P 在乔叶—凋落物—土壤中均显著相关;但在总体混交林中仅有凋落物与土壤中的 P 含量与 C:P 显著相关。(4)刺槐+山杨混交林乔木层碳储量显著高于刺槐纯林,刺槐+油松混交林林下植被层与土壤层碳储量显著高于刺槐纯林。研究结果为深入了解黄土高原养分循环机制奠定基础,同时也为黄土高原人工林的经营管理提供理论依据。

**关键词:** 刺槐; 油松; 混交林; 养分含量; 碳储量

中图分类号:S714.5      文献标识码:A      文章编号:1009-2242(2022)02-0238-09  
DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.030

## Ecological Stoichiometry and Carbon Storage of *Robinia pseudoacacia* Mixed Forests in the Hilly-gully Area of the Loess Plateau

JIAO Qiuyan<sup>1,2</sup>, HUANG Linjia<sup>1,2</sup>, ZHANG Juanjuan<sup>3</sup>, ZHANG Xu<sup>3</sup>,  
HUANG Ning<sup>4</sup>, GUO Zhen<sup>5</sup>, CAO Yang<sup>1,6</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;  
4.Soil and Water Conservation Service Center of Beichuan Qiang Autonomous County, Beichuan Qiang Autonomous County, Sichuan 622750; 5.Sichuan Huabiao Testing Technology Co., Ltd., Chengdu 610066; 6.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** To investigate the differences of nutrient status and carbon (C) sequestration capacity between mixed forests and pure forests, the pure forests of *Robinia pseudoacacia*, pure forests of *Pinus tabulaeformis*, mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis*, and mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Populus davidiana*, located in Loess Hilly and gully region of China, were taken as the objects. Through the field investigation and indoor analysis, the ecological stoichiometry and C storage of the pure and mixed forests ecosystems were studied. The results showed that: (1) Compared with the pure forests, the mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* significantly increased the C contents of branches and roots, the phosphorus (P) contents of leaves and trunks, the C:P and N:P ratio of branches of *Robinia pseudoacacia* species, and also significantly increased the nitrogen (N) contents of leaves,

收稿日期:2021-09-01  
资助项目:黄土丘陵区刺槐沙棘混交林种间养分协调机制研究(41977418)  
第一作者:焦秋燕(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事流域生态研究。E-mail:jiaoqiuyan19@mailsucas.ac.cn  
通信作者:曹扬(1977—),男,博士,副研究员,主要从事森林生态学研究。E-mail:yangcao@nwsuaf.edu.cn

branches and roots and the N : P ratio of branches, trunks and roots of *Pinus tabuliformis* species, but significantly decreased the C : N ratio of all organs of *Pinus tabuliformis* species, while the mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Populus davidiana* only significantly increased the P content of branches of *Robinia pseudoacacia*. (2) The content of soil C in the mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* was significantly higher than that of the pure *Robinia pseudoacacia* forests, and the content of soil P was significantly lower than that of the pure *Pinus tabuliformis* forests. The differences of P in the soils between the mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Populus davidiana* and the pure forests of *Robinia pseudoacacia* were not significant. (3) There was a significant correlation between the leaf and litter C contents in two pure forests. And the C : N, C : P ratios of the total pure forests were significantly correlated between tree leaf-litter-soil; but in total mixed forests, only P contents in litter and soil were significantly correlated with C : P ratio. (4) The C storage in tree layer of mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Populus davidiana* was significantly higher than that of the pure *Robinia pseudoacacia* forests, and the C storage in understory vegetation layer and soil layer of mixed forests of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* was significantly higher than those in the pure *Robinia pseudoacacia* forests. This study could not only lay a foundation for an in-depth understanding of the nutrient cycle mechanism in the Loess Plateau, but also provide a theoretical basis for the management of plantation in the Loess Plateau.

**Keywords:** *Robinia pseudoacacia*; *Pinus tabuliformis*; mixed forests; nutrient content; carbon storage

由于地形陡峭,夏季暴雨频繁,生态环境脆弱,土地利用不当,黄土高原被认为是世界上水土流失最严重的地区之一<sup>[1]</sup>。而植树造林则是该地区治理水土流失、恢复其生态稳定性的有效措施<sup>[2]</sup>。为了节省种植成本以及方便管理,造林时大多种植纯林<sup>[3]</sup>,刺槐与油松是该地区的主要造林树种<sup>[4]</sup>。然而,纯林会对当地环境造成不利的影响,如生物多样性降低、病虫害频发、土壤肥力下降、立地条件差等<sup>[5]</sup>。与纯林相比,混交林不仅能提高森林生态系统的生产力和稳定性,还具有更强的抗逆性。因此,实施混交造林成为提高人工林稳定性与可持续经营的重要手段<sup>[6]</sup>。

森林是陆地生态系统最大的碳库<sup>[7]</sup>。森林植被通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,发挥巨大的碳汇功能,并且因其碳汇量大、成本低、生态附加值高等特点,森林生态系统将在我国实现碳达峰目标与碳中和愿景中扮演着越来越重要的作用<sup>[8]</sup>。目前,关于混交林与纯林在碳储量方面的研究虽然已有较多报道,但因混交树种、混交比例、立地条件不同而使研究结果产生较大差异。如对凤凰山不同林分类型的总碳储量研究<sup>[9]</sup>表明,落叶松与阔叶树种混交能增加灌木层和草本层的碳储量;Bijalwan 等<sup>[10]</sup>对印度热带干燥地区不同类型森林的土地利用、生物量与碳储量进行研究表明,混交林的生物量与碳储量高于其他林分类型;广西大青山地区马尾松与红椎混交林及其纯林生物量和碳储量研究<sup>[11]</sup>结果表明,马尾松与红椎混交林生物量与碳储量大于红椎纯林,但却小于马尾松纯林。生态化学计量主要研究生态过程中多种化学元素(主要是 C、N、P)的平衡关系<sup>[12]</sup>,C、N、P 作为植

物体重要的生命元素,对生态系统碳汇能力起着至关重要的作用,而且研究生态系统植物 C、N、P 及其化学计量特征,也对生态系统养分循环及其作用机制具有十分重要的意义。目前,黄土丘陵地区生态系统化学计量方面的研究较多,如黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征的研究表明,人工林 N 含量在叶片与凋落物间为显著正相关,天然次生林 N 含量在凋落物与土壤间为极显著正相关<sup>[13]</sup>;黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统的生态化学计量特征结果表明,刺槐乔木各器官 C 含量显著低于油松,但 N 和 P 含量显著高于油松,而刺槐林下调落物 N 和 P 含量显著高于油松,但 C 含量显著小于油松<sup>[4]</sup>;黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征研究<sup>[14]</sup>表明,不同植被区、坡向和土层的土壤养分含量及其化学计量特征均有明显不同。这些研究在不同植被区上探讨了森林的生态化学计量,丰富了黄土高原生态化学计量数据库。然而,目前的研究主要集中在纯林中,对混交林生态系统养分循环与固碳能力的报道相对较少。因此,为了阐明纯林与混交林的养分状况和固碳能力之间的差异,本文开展了纯林和混交林关于化学计量特征与碳储量方面的对比研究,为深入了解黄土高原养分循环机制奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在陕西省永寿县,位于陕西省中部偏西,渭北黄土高原南缘。该区属于典型的黄土丘陵沟壑区,暖温带大陆性气候<sup>[15]</sup>。地势北高南低,海拔

990~1 440 m,最高点在黑山,最低点在店头坡龙头沟谷。年平均日照时间为 2 166.2 h,年平均降水量 587.6 mm,多集中于夏季,无霜期为 210 天。永寿县主要以黄绵土、黑垆土为主,且腐殖质层较厚。该区主要人工造林树种为侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*),主要生长的灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*),而草本则以糙苏(*Phlomis umbrosa*)、柯孟披碱

草(*Elymus kamoji*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、大蓟(*Cirsium japonicum* Fisch)为主。

2019 年 8 月在永寿县永平林地内选取林龄(约 30 年)和立地条件相近的林地,主要包括刺槐纯林、油松纯林、刺槐+油松混交林与刺槐+山杨混交林,2 种类型的混交林混交比例均为 5:5,混交方式均为株间混交。每种森林类型选取 3 个重复样地,共 12 块样地,每个样地大小均为 20 m×20 m,在样地调查中测定并记录样地的郁闭度、坡向与坡度等信息,基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

| 林分  | 树种 | 郁闭度  | 坡度/<br>(°) | 坡向 | 林分密度/<br>(株·hm <sup>-2</sup> ) | 平均<br>胸径/cm | 平均<br>树高/m |
|-----|----|------|------------|----|--------------------------------|-------------|------------|
| 纯林  | 刺槐 | 0.65 | 14~19      | SE | 1200                           | 15.11±0.53  | 12.4±0.7   |
| 纯林  | 油松 | 0.70 | 18~22      | SE | 1195                           | 14.35±0.72  | 10.6±0.9   |
| 混交林 | 刺槐 | 0.60 | 15~19      | SE | 565                            | 16.79±0.84  | 12.6±0.8   |
|     | 油松 |      |            |    | 580                            | 11.90±0.21  | 9.0±0.4    |
| 混交林 | 刺槐 | 0.80 | 17~21      | S  | 550                            | 14.81±0.79  | 11.5±0.8   |
|     | 山杨 |      |            |    | 600                            | 15.24±0.76  | 16.8±1.1   |

注:平均胸径和平均树高的数据为平均值±标准差。

1.2 样地调查和样品采集与处理

对各个样地进行每木检尺,按树种各选取 3 株标准木,用高枝剪在每株树冠处选取 3 个健康枝条采集枝和叶,在每株标准木树干的胸径处钻取 3 个树芯,并用根钻挖取 0—100 cm 土层的根,分器官(叶、枝、干、根)均匀混合。在每个样地按“品”字形分别设置 3 个 2 m×2 m 灌木与草本调查样方,用全收获法采集灌木的叶、枝、根以及草本的地上与地下部分,并收集样方内所有凋落物。此外,每个小样方均随机选取 3 个土壤取样点,采用环刀法测定土壤容重,另取土样 300 g 放入塑封袋运回,风干、磨碎、过筛后用于后续化学测定。将除土壤以外的所有样品在 65 ℃恒温下烘干,测定其干重。所有样品均采用加热—重铬酸钾氧化法测定 C 含量、凯氏定氮法测定 N 含量、钼锑抗比色法测定 P 含量<sup>[16]</sup>。

1.3 生物量计算

乔木各器官生物量采用与本研究区自然条件相近的区域构建的生物量异速方程进行计算<sup>[17]</sup>(表 2)。

1.4 混交林乔木叶片与土壤层 C、N、P 含量计算

在计算相关系数时,采用生物量加权平均的方法计算混交林乔木叶片(以下简称“乔叶”)和混交林 0—60 cm 土壤层 C、N、P 含量。混交林乔叶、0—60 cm 土壤层 C、N、P 含量计算公式分别为<sup>[18]</sup>:

$$E_{\text{org}} = \sum E_i \times \frac{B_i}{B_{\text{org}}}$$

(1)

式中: $E_{\text{org}}$ 为混交林乔叶的 C、N、P 含量(g/kg); $E_i$ 和  $B_i$ 分别为混交林某一树种乔叶的 C、N、P 含量(g/

kg)与生物量(t/hm<sup>2</sup>); $B_{\text{org}}$ 为混交林中所有树种的乔叶生物量(t/hm<sup>2</sup>)。

表 2 刺槐、油松和山杨的生物量异速方程

| 树种 | 组分 | 生物量方程                                | $R^2$ |
|----|----|--------------------------------------|-------|
| 刺槐 | 叶  | $\ln(Y) = -2.608 + 1.400\ln(D)$      | 0.844 |
|    | 枝  | $\ln(Y) = -3.206 + 2.377\ln(D)$      | 0.973 |
|    | 干  | $\ln(Y) = -2.360 + 2.424\ln(D)$      | 0.988 |
|    | 根  | $\ln(Y) = -1.597 + 2.008\ln(D)$      | 0.973 |
| 油松 | 叶  | $\ln(Y) = -5.3277 + 0.8812\ln(D^2H)$ | 0.949 |
|    | 枝  | $\ln(Y) = -6.3807 + 1.1242\ln(D^2H)$ | 0.983 |
|    | 干  | $\ln(Y) = -3.8828 + 0.9359\ln(D^2H)$ | 0.996 |
|    | 根  | $\ln(Y) = -4.7557 + 0.9204\ln(D^2H)$ | 0.982 |
| 山杨 | 叶  | $Y = 0.079D^{2.960}H^{1.788}$        | 0.931 |
|    | 枝  | $Y = 0.004D^{2.846}$                 | 0.922 |
|    | 干  | $Y = 6.290 - 2.133D + 0.315D^2$      | 0.994 |
|    | 根  | $Y = 0.003(D^2H)^{1.071}$            | 0.921 |

注:Y 为乔木不同器官生物量(kg);D 为胸径(cm);H 为树高(m)。

$$E_{\text{soil}} = \frac{\sum E_{sk} \times BD_{sk} \times T_k}{\sum BD_{sk} \times T_k}$$

(2)

式中: $E_{\text{soil}}$ 为混交林 0—60 cm 土壤层的 C、N、P 含量(g/kg); $E_{sk}$ 为土壤层  $k$  的 C、N、P 含量(g/kg); $BD_{sk}$ 为土壤层  $k$  的容重(g/cm<sup>3</sup>); $T_k$ 为土壤层  $k$  的厚度(cm)。

1.5 植物各器官碳储量计算

植物各器官碳储量由计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$\text{TOC}_i = C_i \times B_i / 1000$$

(3)

式中:TOC<sub>*i*</sub>为某器官碳储量; $C_i$ 为某器官有机碳含量(g/kg); $B_i$ 为某器官生物量(t/hm<sup>2</sup>)。混交林中乔木层某器官碳储量为混交林中 2 个树种乔木层某器官碳储量之和。

1.6 土壤碳储量计算

土壤碳储量计算公式为<sup>[20]</sup>：

$$SOC=\sum_{i=1}^m C_i\times H_i\times B_i\times (1-S_i)\times 10 \quad (4)$$

式中：SOC 为土壤碳储量(t/hm<sup>2</sup>)；C<sub>i</sub>为土壤有机碳含量(g/kg)；H<sub>i</sub>为第 i 层土壤厚度(m)；B<sub>i</sub>为第 i 层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)；S<sub>i</sub>为第 i 层土壤直径>2 mm 砾石体积含量(%)。黄土丘陵沟壑区的土壤以黄土为主,砾石体积含量很小,计算时忽略不计,故 S<sub>i</sub>=0。

1.7 统计分析

在单因素方差分析(One－way ANOVA)中采用 Duncan 法比较不同林分类型间的生态化学计量特征、土壤碳储量的差异性。对叶片、凋落物、土壤中的 C、N、P 含量及化学计量特征进行相关分析,方法

采用 Pearson 相关分析法。图表中数据为平均值±标准差,数据均在 SPSS 22.0 软件中进行分析。

2 结果与分析

2.1 纯林和混交林生态系统 C、N、P 含量及其化学计量特征的差异

刺槐+油松混交林显著增加刺槐枝和根的 C 含量以及油松叶、枝和根的 N 含量(表 3),并且还显著增加刺槐中叶、干的 P 含量;刺槐+山杨混交林没有显著增加刺槐各器官的 C 含量与 N 含量,但显著增加刺槐枝的 P 含量。刺槐+油松混交林显著降低油松各器官的 C:N 值,显著增加刺槐枝的 C:P、N:P 和油松枝、干、根的 N:P,但是刺槐+山杨混交林没有显著增加刺槐各器官的 C:N、C:P 和 N:P。

表 3 纯林与混交林乔木层各器官 C、N、P 含量及其化学计量特征

| 元素含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |    | 纯林              |                 | 混交林            |                |                |                |
|--------------------------------|----|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 与元素比                           | 器官 |                 |                 | 刺槐+油松          |                | 刺槐+山杨          |                |
|                                |    | 刺槐              | 油松              |                |                |                |                |
| C                              | 叶  | 471.75±9.44a    | 514.48±15.27a   | 506.83±19.76a  | 509.46±23.56a  | 479.09±6.26a   | 502.26±36.51a  |
|                                | 枝  | 445.29±9.18b    | 510.25±10.28a   | 504.83±20.42a  | 506.94±36.18a  | 458.43±14.73b  | 481.68±26.37ab |
|                                | 干  | 445.32±15.64a   | 497.48±6.70a    | 477.45±42.24a  | 490.51±29.64a  | 461.16±23.93a  | 486.26±19.05a  |
|                                | 根  | 384.86±9.04c    | 474.85±8.27a    | 484.79±26.66a  | 447.13±13.85ab | 420.28±16.52bc | 464.56±39.78ab |
| N                              | 叶  | 33.79±1.80a     | 10.38±0.82c     | 32.22±3.25a    | 18.17±1.09b    | 30.37±1.17a    | 12.65±1.92c    |
|                                | 枝  | 20.10±0.97a     | 4.22±0.13c      | 20.29±2.36a    | 13.06±0.66b    | 22.33±2.94a    | 4.43±0.58c     |
|                                | 干  | 9.44±0.56a      | 1.84±0.07b      | 9.95±1.96a     | 2.09±0.03b     | 9.32±0.96a     | 1.25±0.03b     |
|                                | 根  | 25.38±1.16a     | 2.49±0.36c      | 28.69±2.84a    | 19.14±1.05b    | 26.45±3.35a    | 2.48±0.29c     |
| P                              | 叶  | 1.37±0.30b      | 0.86±0.09c      | 1.78±0.06a     | 1.077±0.12bc   | 1.16±0.19bc    | 0.89±0.17c     |
|                                | 枝  | 0.93±0.10b      | 0.54±0.15cd     | 0.36±0.004d    | 0.84±0.19bc    | 1.28±0.19a     | 0.55±0.10cd    |
|                                | 干  | 0.32±0.08b      | 0.22±0.12b      | 0.89±0.13a     | 0.18±0.04b     | 0.28±0.05b     | 0.18±0.04b     |
|                                | 根  | 0.48±0.09ab     | 0.29±0.08b      | 0.64±0.12a     | 0.50±0.09ab    | 0.66±0.18a     | 0.48±0.05ab    |
| C:N                            | 叶  | 14.02±1.73c     | 49.99±5.14a     | 15.83±1.43c    | 34.77±1.45b    | 17.71±2.01c    | 33.50±2.10b    |
|                                | 枝  | 22.19±0.75d     | 121.05±5.65a    | 24.66±4.94d    | 38.98±3.48c    | 19.56±1.99d    | 109.57±9.15b   |
|                                | 干  | 47.23±1.52c     | 304.85±27.28b   | 47.28±6.23c    | 55.52±8.36c    | 43.01±8.42c    | 388.02±11.56a  |
|                                | 根  | 15.18±0.35b     | 195.02±29.65a   | 17.06±2.17b    | 23.44±1.48b    | 16.47±3.57b    | 190.33±29.38a  |
| C:P                            | 叶  | 358.94±67.00bc  | 604.47±51.25a   | 285.22±5.99c   | 479.70±65.03ab | 424.21±65.32bc | 578.47±108.52a |
|                                | 枝  | 483.43±44.51c   | 813.82±82.26ab  | 1416.36±75.39a | 517.24±56.54bc | 365.70±49.04c  | 1070.05±43.70b |
|                                | 干  | 1673.47±52.35ab | 1420.24±83.56a  | 543.55±63.23b  | 2421.69±92.89a | 1254.24±8.39ab | 2730.28±80.25a |
|                                | 根  | 744.13±81.06b   | 1471.82±230.97a | 645.70±22.18b  | 767.32±23.76b  | 864.45±76.61b  | 882.23±62.86b  |
| N:P                            | 叶  | 25.75±5.33a     | 12.33±2.42b     | 18.13±1.26ab   | 17.05±2.20ab   | 25.22±1.44a    | 21.85±9.17a    |
|                                | 枝  | 21.74±1.27b     | 8.54±2.38c      | 28.83±5.19a    | 16.48±4.05b    | 19.50±1.09b    | 8.26±1.43c     |
|                                | 干  | 31.43±7.44b     | 9.15±1.68c      | 9.09±2.04c     | 53.51±15.63a   | 33.63±0.47b    | 7.35±1.41c     |
|                                | 根  | 55.90±13.72a    | 9.31±2.68c      | 45.26±4.99ab   | 40.39±11.29b   | 39.17±2.37b    | 5.23±0.64c     |

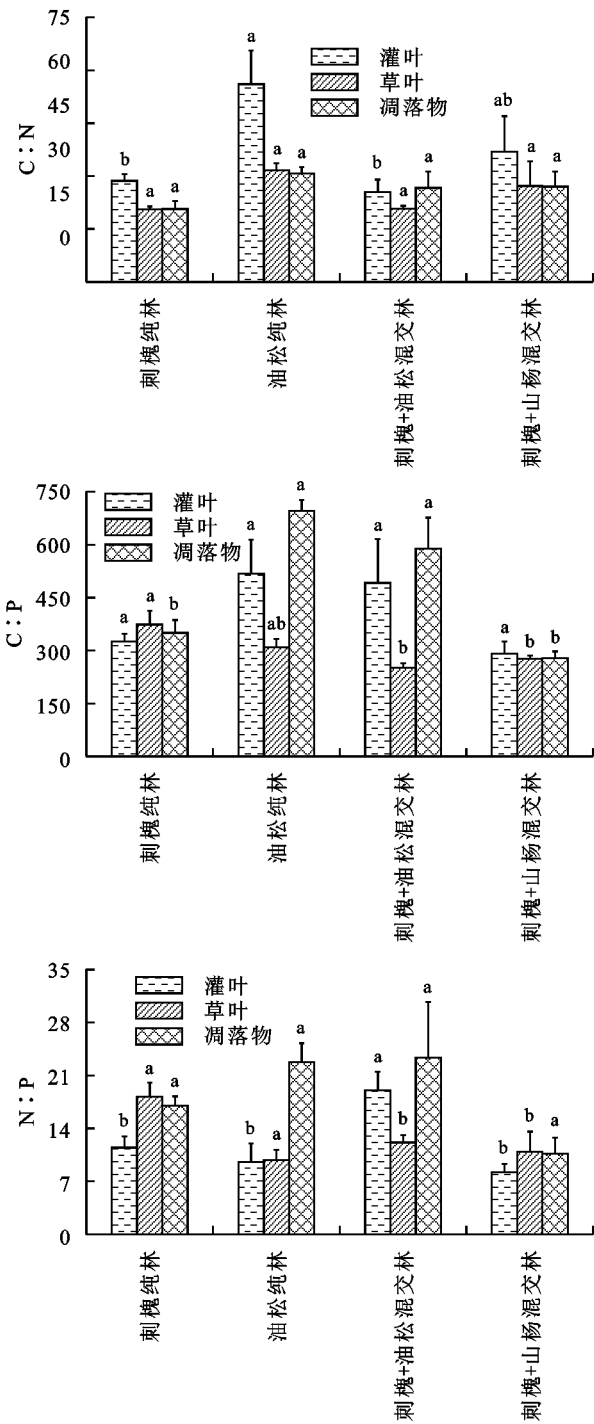
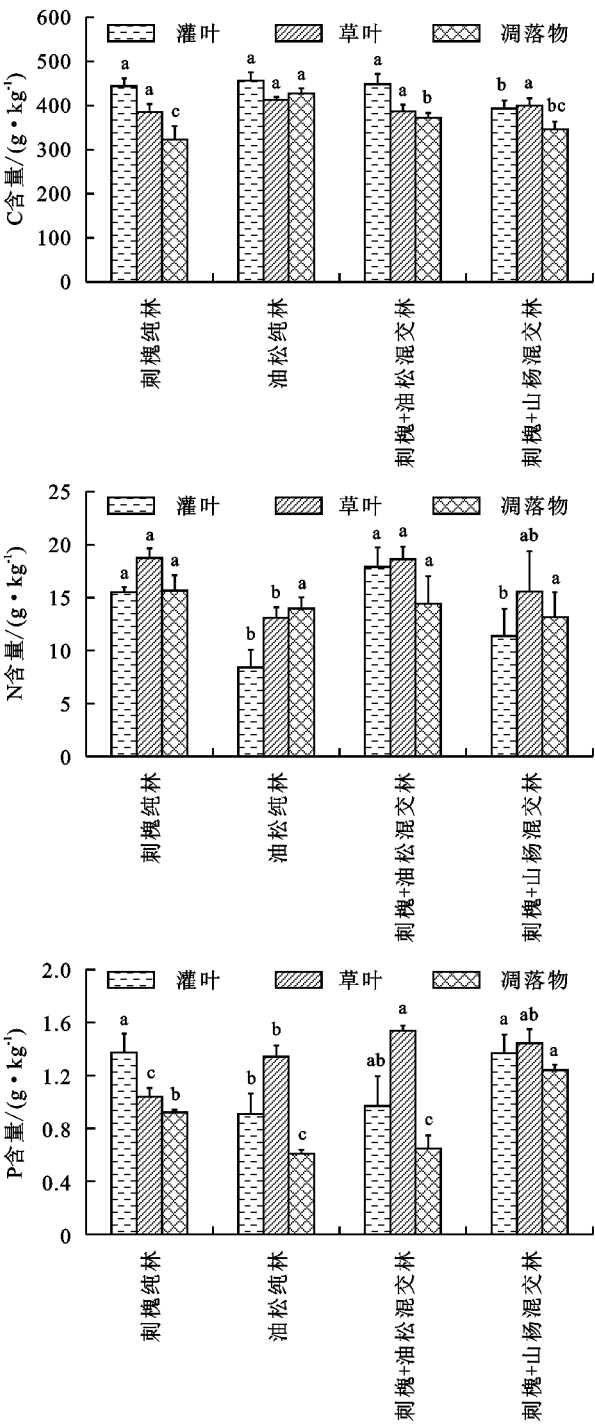
注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示纯林与混交林同一指标差异显著(P<0.05)。

灌木叶片(以下简称“灌叶”)的 C 含量表现为油松纯林(455.98 g/kg)>刺槐+油松混交林(448.57 g/kg)>刺槐纯林(444.02 g/kg)>刺槐+山杨混交林(393.41 g/kg)(图 1),并且刺槐+山杨混交林灌叶的 C 含量显著低于其他 3 种林分。刺槐+油松混交林凋落物的 C 含量显著高于刺槐纯林,却显著低于油松纯林;刺槐+山杨混交林凋落物的 P 含量显著高于刺槐纯林。刺槐+油松混交林草本叶片(以下简称“草叶”)中的 N、P 含量显著高于油松纯林,但仅 P 含量显著高于刺槐纯林。刺槐+山杨混交林中灌叶的 N 含量显著低于刺槐纯林,草叶和凋落物的 P 含量显著高于刺槐纯林。刺槐纯林草叶的 C:P 显著高于 2 种混交林,刺槐+油松混交林凋落物的 C:P 显著高于刺槐纯林与刺槐+山杨混交林。刺槐+油



松混交林灌叶的 N : P 显著高于油松纯林、刺槐纯林

和刺槐+山杨混交林。



注:图中不同字母表示不同林分差异显著(P<0.05)。下同。

图 1 纯林与混交林下灌叶、草叶、凋落物的 C、N、P 含量及其化学计量特征

刺槐+油松混交林土壤 C 含量在 20—40, 40—60 cm 土层中显著高于刺槐纯林和油松纯林,在 0—20 cm 土层中显著高于刺槐纯林与刺槐+山杨混交林(图 2)。油松土壤 N 含量在 20—40 cm 土层中显著高于刺槐+油松混交林,油松土壤 P 含量在这 3 个土层中都显著高于刺槐+油松混交林,并且刺槐+油松混交林土壤 P 含量在 20—40 cm 土层中显著低于刺槐纯林。刺槐+油松混交林土壤中的 C : N 在 20—40 cm 与 40—60 cm 土层中显著高于刺槐纯林

与油松纯林,而 C : P 在整个土层中都显著高于刺槐纯林、油松纯林以及刺槐+山杨混交林。刺槐+油松混交林土壤中的 N : P 在 0—20 cm 土层中显著高于刺槐纯林、油松纯林以及刺槐+山杨混交林,在 20—40 cm 土层中显著高于刺槐+山杨混交林。

2.2 纯林和混交林乔叶—凋落物—土壤的 C、N、P 含量及其化学计量特征的相关性

乔叶—凋落物—土壤的 C、N、P 含量及其化学计量特征的相关分析结果(表 4)表明,在油松纯林与总

体纯林中,乔叶与凋落物的 C 含量均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。刺槐+油松混交林乔叶与土壤的 C 含量呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。在刺槐+山杨混交林中,乔叶与土壤的 P 含量呈显著负相关 ( $P<0.05$ ),在总体混交林中,凋落物与土壤的 P 含量呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。在总体纯林中,除乔叶与凋落物的

N : P 之外,乔叶—凋落物—土壤的 C : N、C : P、N : P 均显著相关 ( $P<0.05$ ),并且油松纯林凋落物与土壤中的 C : P 也显著相关 ( $P<0.05$ )。混交林总体中凋落物与土壤中的 C : P 呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),N : P 在 2 种混交林的乔叶—凋落物中均呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。

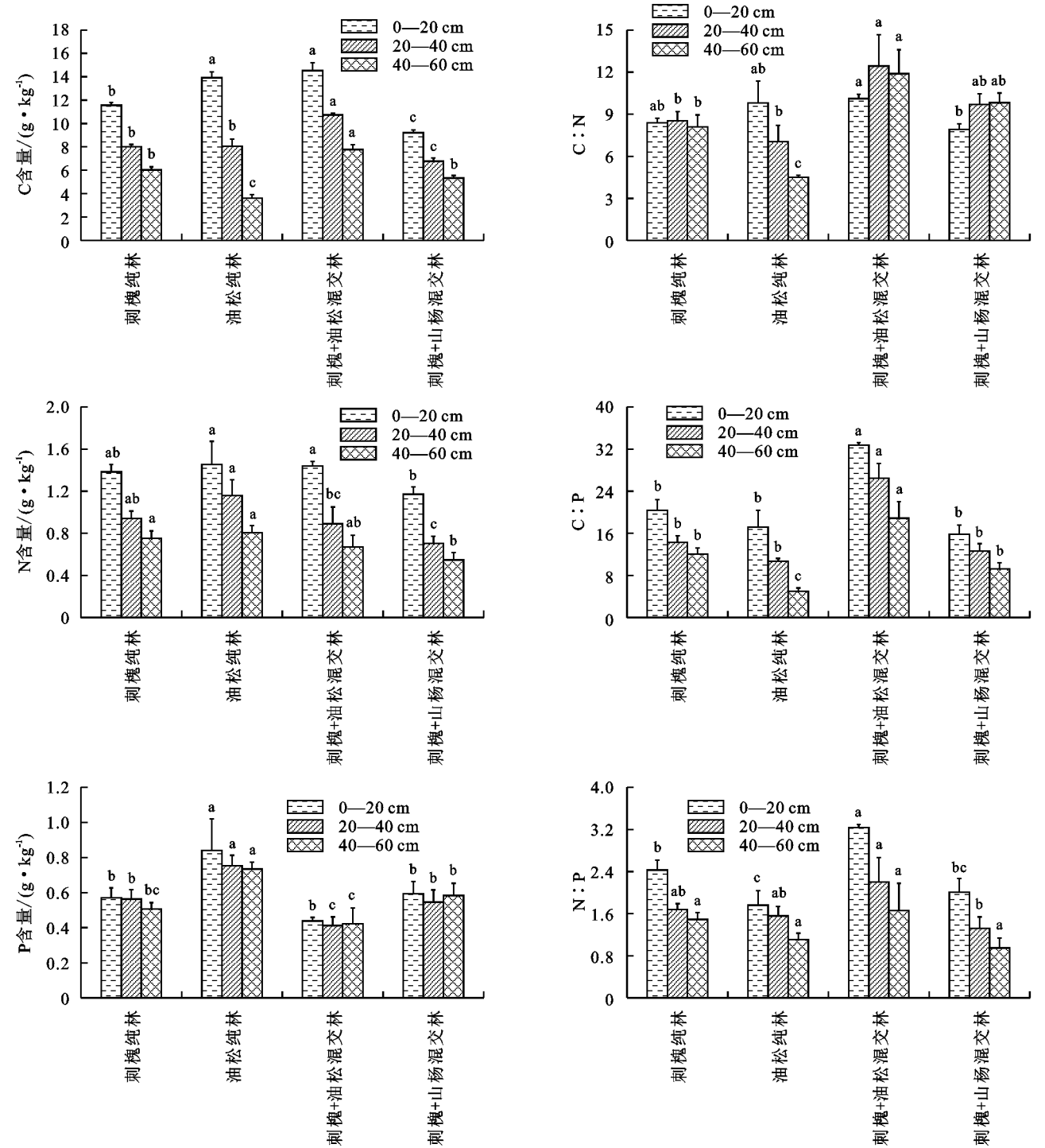


图2 纯林与混交林土壤层 C、N、P 含量及其化学计量特征

2.3 纯林和混交林生态系统碳储量的差异

刺槐+山杨混交林的乔木层总碳储量显著高于刺槐纯林与刺槐+油松混交林,刺槐+油松混交林乔木层总碳储量与刺槐纯林相比无显著性差异,但显著高于油

松纯林(表5)。刺槐+油松混交林灌木层、草本层碳储量显著高于刺槐纯林与油松纯林,刺槐+油松混交林凋落物层碳储量显著高于刺槐纯林,而刺槐+山杨混交林下植被层碳储量与刺槐纯林相比均没有显著性差

异。刺槐+油松混交林在各个土层的碳储量均显著高于刺槐纯林,在 20—40,40—60 cm 土层中,刺槐+油松混交林碳储量均显著高于油松纯林,刺槐+山杨混交林与刺槐纯林在所有土层中均没有显著差异。

表 4 纯林与混交林乔叶—凋落物—土壤间 C、N、P 含量及其化学计量特征的相关系数

| 元素与<br>元素比 | 组成     | 纯林     |          |            | 混交林      |          |            |
|------------|--------|--------|----------|------------|----------|----------|------------|
|            |        | 刺槐林    | 油松林      | 总体         | 刺槐+油松林   | 刺槐+山杨林   | 总体         |
| C          | 乔叶与凋落物 | 0.088  | 0.997 *  | 0.856 *    | 0.277    | 0.065    | 0.354      |
|            | 乔叶与土壤  | 0.097  | 0.919    | 0.619      | −0.998 * | 0.664    | 0.455      |
|            | 凋落物与土壤 | −0.983 | 0.946    | 0.216      | −0.339   | −0.703   | 0.641      |
| N          | 乔叶与凋落物 | 0.697  | −0.686   | 0.584      | −0.949   | 0.793    | −0.061     |
|            | 乔叶与土壤  | 0.895  | −0.128   | 0.230      | 0.499    | 0.154    | 0.469      |
|            | 凋落物与土壤 | 0.944  | 0.809    | 0.628      | −0.746   | −0.480   | −0.002     |
| P          | 乔叶与凋落物 | −0.230 | 0.475    | 0.744      | −0.559   | −0.259   | −0.814     |
|            | 乔叶与土壤  | −0.521 | 0.532    | −0.032     | −0.368   | −0.999 * | −0.917     |
|            | 凋落物与土壤 | −0.711 | −0.493   | −0.029     | 0.977    | 0.226    | −0.947 * * |
| C : N      | 乔叶与凋落物 | 0.955  | −0.403   | 0.896 *    | −0.819   | 0.973    | 0.039      |
|            | 乔叶与土壤  | 0.583  | 0.874    | −0.869 *   | 0.443    | 0.444    | 0.076      |
|            | 凋落物与土壤 | 0.316  | 0.092    | −0.844 *   | −0.877   | 0.226    | −0.163     |
| C : P      | 乔叶与凋落物 | 0.835  | −0.116   | 0.921 * *  | −0.478   | 0.584    | −0.582     |
|            | 乔叶与土壤  | −0.557 | 0.192    | −0.890 *   | −0.773   | −0.852   | −0.684     |
|            | 凋落物与土壤 | −0.922 | −0.997 * | −0.922 * * | 0.927    | −0.922   | 0.944 * *  |
| N : P      | 乔叶与凋落物 | 0.942  | −0.307   | −0.623     | −1.000 * | −0.997 * | −0.407     |
|            | 乔叶与土壤  | 0.278  | 0.921    | 0.879 *    | 0.934    | −0.584   | −0.315     |
|            | 凋落物与土壤 | 0.584  | −0.653   | −0.824 *   | 0.923    | −0.519   | 0.730      |

注: \* 表示  $P<0.05$ ; \* \* 表示  $P<0.01$ 。

表 5 纯林和混交林乔木层、林下植被层与土壤层碳储量分配特征

单位: t/hm<sup>2</sup>

| 层次    | 组分       | 刺槐林          | 油松林         | 刺槐+油松林       | 刺槐+山杨林      |
|-------|----------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 乔木层   | 叶        | 1.19±0.01c   | 3.41±0.33a  | 3.18±0.03a   | 2.50±0.28b  |
|       | 枝        | 10.17±1.47bc | 7.45±1.18c  | 12.26±0.03ab | 14.87±1.81a |
|       | 干        | 27.13±2.43a  | 20.70±3.31a | 28.15±2.45a  | 31.11±7.49a |
|       | 根        | 15.20±1.07b  | 7.70±0.91c  | 15.89±2.01b  | 22.49±1.78a |
|       | 小计       | 53.69±2.00b  | 39.26±2.93c | 59.48±1.23b  | 70.97±5.86a |
| 林下植被层 | 灌木层      | 7.33±1.07b   | 2.10±0.097c | 9.79±0.28a   | 7.09±1.29b  |
|       | 草本层      | 3.13±0.38b   | 0.59±0.21c  | 4.45±0.67a   | 2.11±0.38b  |
|       | 凋落物层     | 5.91±0.25bc  | 8.18±0.59ab | 9.96±2.06a   | 4.21±1.11c  |
|       | 0—20 cm  | 30.05±0.40b  | 37.49±1.48a | 39.10±3.66a  | 26.68±3.96b |
| 土壤层   | 20—40 cm | 22.78±0.75b  | 21.78±2.37b | 28.82±1.51a  | 19.63±1.01b |
|       | 40—60 cm | 15.67±0.75b  | 9.77±0.93c  | 20.83±0.79a  | 15.42±0.61b |
|       | 小计       | 66.50±1.18b  | 69.04±3.56b | 88.75±5.34a  | 61.74±3.58b |

注: 数字后不同小写字母表示纯林与混交林同一指标差异显著( $P<0.05$ )。

3 讨论

3.1 纯林与混交林生态系统 C、N、P 含量及其化学计量特征的差异

本地区刺槐纯林乔木叶片 C 含量范围为 471~479 g/kg, 高于黄土高原植物叶片的平均含量 438 g/kg<sup>[21]</sup>, 可能是因为研究区位于黄土高原南部, 气候条件较好, 植物固碳能力强。油松纯林和混交林中的油松林乔叶 C 含量高于其他树种, 这可能是由于常绿针叶树种富含单宁、酚类等化合物<sup>[22]</sup>。而刺槐纯林以及刺槐混交林中各组分的 N 含量显著高于其他林分, 原因是刺槐作为一种固氮树种, 可以通过根瘤菌

固定更多的 N 元素<sup>[13]</sup>。土壤中的 C、N 随着土层深度的增加而降低, 这是因为表层土壤能接收到凋落物的归还量最多, 并随着土层深度的增加而减少, 有机质含量也随之降低。而 P 含量则保持相对稳定, 这可能是由于 P 元素所形成的矿物质具有沉积性, 在土壤中不易发生迁移<sup>[23]</sup>。植物叶片 C : N 和 C : P 作为重要的生理指标能够反映植物生长的速度, 一般认为低的 C : N 和 C : P 表征植物具有较快的生长速率<sup>[12]</sup>。而本研究结果表明, 油松纯林乔木层各器官的 C : N 显著高于刺槐+油松混交林, 但是生物量却较低, 这可能与油松纯林的生物学特性有关。凋落

物的 C : N 和 C : P 可以表明其分解速率和养分归还速率<sup>[24]</sup>。油松纯林中凋落物的 C : N 和 C : P 大于刺槐与油松混交林,证明油松凋落物的分解速度慢,更有利于养分的储存。在 0—60 cm 土层中,油松纯林的土壤 P 含量显著高于刺槐+油松混交林,这可能是由于混交林草本物种多样性高于纯林,而草本物种多样性与土壤 P 含量成显著负相关<sup>[25]</sup>,因此造成油松纯林土壤 P 含量较高。但是本研究的土壤 P 含量显著低于全球水平的 2.8 g/kg<sup>[26]</sup>,这可能是因为黄土高原水土流失严重,因而土壤 P 含量较低。在 0—60 cm 土层中,刺槐+油松混交林的土壤 C 含量显著高于刺槐纯林,这也造成在整个土层中刺槐+油松混交林的 C : N、C : P 均显著高于刺槐纯林和油松纯林。植物通过根系从土壤中吸收各种所需元素,然后以植物残体的形式返还给土壤<sup>[3]</sup>。在总体纯林中,乔叶与凋落物之间的 C : N、C : P 呈现显著的正相关,乔叶与土壤、凋落物与土壤之间的 C : N、C : P 呈现显著的负相关,在刺槐与山杨混交林中,乔叶与土壤中的 P 元素、乔叶与凋落物之间的 N : P 都呈现显著负相关,说明生态系统内部的 C、N、P 等元素循环是在植物—凋落物—土壤库之间运输和转换的,彼此之间关系密切。

### 3.2 纯林和混交林生态系统碳储量的差异

森林生态系统碳储量受多种因素的影响,如自然灾害、林龄、树种特性等<sup>[27]</sup>。本研究中混交林生态系统的碳储量大于纯林,原因是物种丰富度可以提高林分生产力,并且促进生态系统碳汇能力<sup>[28]</sup>。混交林中的物种由于轮作周期和生态位的差异,对阳光、养分和水分的限制低于纯林<sup>[29]</sup>,因而比纯林具有更高的生物量,导致混交林生态系统有机碳库积累较高。有研究<sup>[30]</sup>表明,黄土高原混交林可以显著提高土壤碳储量,这与本研究结果一致。混交林通常比纯林有更高的物种丰富度与植物残体输入量,高度物种多样性可以增加凋落物的数量和种类,从而导致土壤有机碳库的积累高于纯林<sup>[31]</sup>。此外,混交林中土壤大团聚体的数量高于纯林<sup>[32]</sup>,而大团聚体的增加可以减少土壤侵蚀引起的有机质流失,促进土壤有机碳库的积累<sup>[33]</sup>。

## 4 结论

(1)刺槐+油松林混交显著增加刺槐林枝和根的 C 含量、油松林叶、枝和根的 N 含量以及刺槐林叶、干的 P 含量。刺槐+山杨混交林没有显著增加刺槐各器官的 C、N 含量,但显著增加刺槐枝的 P 含量。

(2)油松纯林中凋落物的 C : N 和 C : P 大于刺槐与油松混交林,证明油松凋落物的分解速度慢,更有利于养分的储存。而刺槐+油松混交林凋落物的 C : N 和 C : P 大于刺槐纯林,证明该混交林比刺槐纯林更有利于养分的储存。

(3)刺槐+山杨混交林乔木层碳储量显著高于刺槐纯林,刺槐+油松混交林林下植被层与土壤层碳储量显著高于刺槐纯林。为了维护黄土高原脆弱的生态环境,宜多种植含有固氮树种的刺槐与油松混交林以持续固碳固氮。

### 参考文献:

[1] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5):499-510.

[2] 刘国彬,王兵,卫伟,等.黄土高原水土流失综合治理技术及示范[J].生态学报,2016,36(22):7074-7077.

[3] 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(1):1-14.

[4] 章广琦,张萍,陈云明,等.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(4):1328-1336.

[5] Wang H, Liu S R, Wang J X, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300:4-13.

[6] Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L. On the success and failure of mixed-species tree plantations: Lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 209(1/2):147-155.

[7] 胡海清,罗碧珍,罗斯生,等.林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展[J].林业科学,2020,56(4):160-169.

[8] 徐耀粘,江明喜.森林碳库特征及驱动因子分析研究进展[J].生态学报,2015,35(3):926-933.

[9] 孙红阳,王庆成.张广才岭西坡 45 年生不同起源林分碳储量研究[J].植物研究,2015,35(3):378-383.

[10] Bijalwan A, Swamy S L, Sharma C M. Land-use, biomass and carbon estimation in dry tropical forest of Chhattisgarh region in India using satellite remote sensing and GIS [J]. Journal of Forestry Research, 2010, 21(2):161-170.

[11] 牛长海.马尾松与红椎混交林及其纯林生物量和碳贮量研究[D].南宁:广西大学,2012.

[12] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000, 3(6):540-550.

[13] 张萍,章广琦,赵一娉,等.黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(14):5087-5098.

[14] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.

[15] Zhang J, Qu M, Wang C, et al. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: A case



- study at the county level in the Chinese Loess Plateau [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01110.
- [16] 袁坤宇, 永寿县典型人工林生态系统服务功能评估 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [17] 李泰君, 陕西黄土高原人工刺槐林碳固持特征与影响因子 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [18] 刘璐, 葛结林, 舒化伟, 等. 神农架常绿落叶阔叶混交林碳氮磷化学计量比 [J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 482-489.
- [19] 巫涛, 彭重华, 田大伦, 等. 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4034-4042.
- [20] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [21] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. *Trees*, 2007, 21(3): 357-370.
- [22] Thomas S C, Martin A R. Carbon content of tree tissues: A synthesis [J]. *Forests*, 2012, 3(2): 332-352.
- [23] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(12): 1146-1155.
- [24] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 等. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [25] 张涵丹, 康希睿, 邵文豪, 等. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征 [J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2118-2128.
- [26] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 [M]. 1 卷. 北京: 中国农业出版社, 1993: 1-934.
- [27] 吴胜男, 李岩泉, 于大炮, 等. 基于 VAR 模型的森林植被碳储量影响因素分析: 以陕西省为例 [J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 196-203.
- [28] Huang Y Y, Chen Y X, Castro I N, et al. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment [J]. *Science*, 2018, 362(6410): 80-83.
- [29] 彭文俊, 王晓鸣. 生态位概念和内涵的发展及其在生态学中的定位 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 327-334.
- [30] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, et al. Mixed-species plantations enhance soil carbon stocks on the loess plateau of China [J]. *Plant Soil*, 2020, 464(1/2): 13-28.
- [31] Jerome L, Denis A. As, David P. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [32] Yahya K, Mohammad B. Composition of tree species can mediate spatial variability of C and N cycles in mixed beech forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 401: 55-64.
- [33] Wang B R, Zhao X D, Liu Y, et al. Using soil aggregate stability and erodibility to evaluate the sustainability of large-scale afforestation of *Robinia pseud-acacia* and *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 450: e117491.
- (上接第 237 页)
- [17] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [18] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K. et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [19] 赵荣玮, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 178-183.
- [20] 李登武, 王冬梅, 姚文旭. 油松的自毒作用及其生态学意义 [J]. *林业科学*, 2010, 46(11): 174-178.
- [21] 王志强, 刘宝元, 王晓兰. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响 [J]. *地理研究*, 2005, 4(1): 113-120.
- [22] 孙中峰, 周玉喜, 朱金兆, 等. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究 [J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5): 43-49.
- [23] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究 [J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 272-278.
- [24] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3685-3695.
- [25] 刘海威, 张少康, 焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应 [J]. *草业学报*, 2016, 25(10): 31-39.
- [26] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 等. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3216-3225.
- [27] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(12): 424-427.
- [28] 董秀群, 王百田, 武中鹏, 等. 晋西黄土区三种林地土壤养分随林分生长的变化 [J]. *林业科学研究*, 2018, 31(2): 69-76.